

Análisis de rendimiento de la cántara de una draga de succión en marcha en función de la granulometría del material transportado

Analysis of the performance of the hopper of a suction dredger in operation
 in accordance with the particle size of transported material

Fátima Calderay Cayetano. Licenciada en Ciencias del Mar. Máster en Gestión Integral del Agua
 Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos. Univ. de Cádiz. CASEM. faticalderay@hotmail.com

Vanesa Durán Grados. Licenciada en Máquinas Navales. Doctora en Ingeniería Industrial
 Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos. Univ. de Cádiz. CASEM. vanesa.duran@uca.es

Juan J. Muñoz-Pérez. Ingeniero de Camino, Canales y Puertos. Doctor en Físicas
 Dpto. Física Aplicada. Univ. de Cádiz. CASEM. juanjose.munoz@uca.es

Juan Moreno Gutiérrez. Jefe de Máquinas Marina Mercante. Doctor en Ciencias del Mar
 Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos. Univ. de Cádiz. CASEM. Responsable línea de investigación. juan.moreno@uca.es

Resumen: El proceso de sedimentación en la cántara de una draga de succión en marcha es muy complejo pero, a pesar de ello, actualmente existen modelos basados en la aplicación de las distintas teorías experimentales sobre la difusión turbulenta del material en tanques de sedimentación (Camp (1936) o Dobbins (1944)), que pueden ser aplicados con bastante aproximación, como se comprobará en este artículo, siempre que se tengan en cuenta algunas consideraciones. Se han aplicado dichos modelos a una obra de dragado hidráulico, en la que se transportaron 5 tipos de materiales de distinta granulometría. El objetivo era observar los rendimientos totales del proceso de llenado tomando como base los datos obtenidos durante la ejecución de la obra. Para ello se han calculado las velocidades de sedimentación de los distintos materiales transportados en la cántara al objeto de relacionarlas con las dimensiones de la misma para, de esta manera, comparar también los distintos rendimientos correspondientes a cada uno de dichos materiales. Para estos materiales se ha comprobado que los resultados que se consiguen con la aplicación de las ecuaciones de Stokes y Budryck son prácticamente coincidentes cuando se emplea el modelo de Camp, lo cual es lógico dado el tipo de flujo que se produce. También se hace un análisis comparativo entre los valores de las velocidades cuando se consideran como grano individual o bien como una nube de granos. Al objeto de predecir el rendimiento de la cántara de una draga de succión en marcha, se deberían de considerar todos los casos, marcando como límites las velocidades de Stokes y Budryck por un lado y las que correspondan a la ecuación general corregida por el N° de Reynolds obtenido por cualquiera de estas ecuaciones.

Palabras Clave: Rendimiento; Dragado; TSHD

Abstract: The sedimentation process in the hopper of a trailing suction hopper dredger is very complex though, in spite of this, models are currently available based on the application of different experimental theories concerning the turbulent diffusion of the material in sedimentation tanks (Camp 1936 or Dobbins (1944)). These theories, as shown by this article, may be applied with a reasonable degree of accuracy on the condition that these take into account certain considerations. These models have been applied to a dredging project which transported five types of material of different particle size. The objective was to observe the total performance of the filling process on the basis of data obtained during the work. To this end, a calculation has been made of the sedimentation or settling velocity of the different materials transported in the hopper in order to relate these to the sizes of the same and, in this way, compare the different performances of each material. In these materials it has been seen that the results obtained through the application of Stokes and Budryck equations practically coincide when employing the Camp model, this being logical in view of the type of flow produced. A comparative analysis was also made between the velocities when taking the material in the form of an individual grain or as a group of grains. In order to predict the performance of the hopper in an operating trailing suction dredger it is necessary to consider, in all cases, the velocities established by Stokes and Budryck as limit values and to consider those corresponding to the general equation corrected by the Reynolds number obtained by any of these equations.

Keywords: Performance; Dredger, TSHD

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de julio de 2010.

Recibido: julio/2009. Aprobado: enero/2010

1. Introducción

El sostenimiento de las playas junto con la imperiosa necesidad de mantener la actividad económica de los puertos, ha conducido a un desarrollo espectacular de la industria del dragado. Es interesante remarcar que la draga de rosario o de cangilones se ha convertido en un artefacto propio de museo. Este tipo de draga se encuentra en declive ante otras, como las de succión en marcha, que pueden sustituirlas con mejores condiciones de rendimientos (Moreno Gutiérrez et al. (2003)).

Para la estimación de los procesos de dragado de las dragas de succión en marcha (TSHD) se han desarrollado un gran número de modelos. Comenzando por el modelo de Camp (1946) basado en una ecuación de difusión de flujo bidimensional que estudiaba la influencia de la turbulencia, y que resultó ser algo complicado. Más tarde Groot (1981) estudió los parámetros que dificultan la sedimentación. Posteriormente Miedema y Vlasblom (1996) simplifican las ecuaciones de Camp y definen un modelo que diferencia, dentro de la cántara, tanto la zona de sedimentación como la de overflow.

Aunque el estudio está hecho para definir el modelo de optimización del rendimiento dentro de la cántara en base a la densidad del material, se sabe que realmente lo que se debe tener en cuenta es el peso total de la arena transportada y no sólo el volumen (Muñoz-Pérez et al. (2003)).

Van Rhee (2001) modifica las consecuencias de la erosión en el modelo de Camp basándose en que la influencia es pequeña para las características del modelo. Por otro lado, Ooijens (1999) añade los efectos del tiempo sobre el rendimiento de la sedimentación. Finalmente Miedema (2007) propone un modelo en el que considera variable la altura de sedimentación.

Todos los modelos anteriores están simplificados desde el momento que suponen una distribución uniforme de la velocidad así como que la cántara tiene las dimensiones de cántara ideal. En este artículo se han tomado como referencia los modelos de Vlasblom y Miedema (1995) que están basados en el modelo de Camp (1946, 1953), con la salvedad de que se han considerado condiciones ideales tanto en la cántara como en las velocidades de sedimentación.

2. Material y métodos

Para calcular la velocidad de sedimentación existen varias ecuaciones pero en todas interviene el número de Reynolds bien sea aplicado directamente a la ecuación (1) o bien en la determinación de la ecuación a emplear.

Como norma general y como primera aproximación se puede emplear una ecuación (Miedema et al., 1996) en la que el número de Reynolds tiene una participación directa y que se define de la siguiente forma:

$$v = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_q - \rho_w) \cdot d \cdot \varphi}{3 \cdot \rho_w \cdot C_d}} \quad (1)$$

En esta ecuación:

v : velocidad de sedimentación (m/s)

C_d : coeficiente de arrastre

ρ_w : densidad del agua de mar (kg/m³)

ρ_q : densidad de la arena (kg/m³)

g : gravedad (m/s²)

φ : factor de forma del grano

d : diámetro medio (d_{50}) del grano de arena (m)

El resto de ecuaciones se aplicarán en dependencia del número de Reynolds (Reynolds, 1884) en cuanto que, como ya es sabido, éste define el tipo de flujo, y a cada tipo le corresponde una ecuación.

En este estudio se han utilizado todas ellas y se ha hecho un análisis comparativo

$$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma} \quad (2)$$

El coeficiente de arrastre (dragado) C_d depende del número de Reynolds:

$$Re < 1 \rightarrow C_d = \frac{24}{Re} \quad (3)$$

$$1 < Re < 2000 \rightarrow C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad (4)$$

$$Re > 2000 \rightarrow C_d = 0,4 \quad (5)$$

Por otro lado, para flujo laminar se emplea la ecuación de Stokes (Rowe, 1961) (6), para flujos en

Análisis de rendimiento de la cántara de una draga de succión en marcha en función de la granulometría del material transportado

transición la ecuación de Budryck (De Bree, 1975) (7), y para flujo turbulento la ecuación de Rittinger (Richards, 1907) (8), en las que la velocidad siempre está expresada en m/s.

- Stokes: Flujo laminar, $d < 0,1 \text{ mm}$

$$v = 424 \cdot (\rho_q - \rho_w) \cdot d^2$$

(6)

- Budryck: Zona de transición, $0,1 < d < 1 \text{ mm}$

$$v = 8,925 \cdot \frac{\left(\sqrt{1 + 95 \cdot [\rho_q - \rho_w] \cdot d^3} - 1 \right)}{d}$$

(7)

- Rittinger: Flujo turbulento, $d > 1 \text{ mm}$

$$v = 87 \cdot \sqrt{(\rho_q - \rho_w) \cdot d}$$

(8)

Consecuentemente para el cálculo de la velocidad de sedimentación, con independencia de la ecuación empleada, habrá que determinar los siguientes parámetros:

- Densidad de la muestra en seco
 - Análisis de la curva granulométrica
 - Diámetro medio del grano d_{50} (d)

Para la determinación de todos estos parámetros habrá que tomar muestras y posteriormente proceder a su secado y tamizado. En todos los casos de estudio, las muestras que se han analizado han sido extraídas de la cántara en zonas lo suficientemente alejadas del punto de descarga como para que pudieran ser significativas. Para el secado y posterior filtrado por tamices se han empleado los siguientes equipos:

- Tamizadora → SIEVE SHAKER MOD.RP.09. CISA

- Granatario → SERIE SV. Gram precision
- Tamiz → Acero inoxidable. CISA. Norma ISO-3310.1. La serie de tamices utilizados por diámetros son: 1 mm, 0,5 mm, 0,250 mm, 0,1 mm y 0,0625 mm

Previo al tamizado, las muestras se secaron en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ durante 48 horas. Una vez secas, se desarrolló el siguiente procedimiento de tamizado:

- Se montaron los tamices de mayor a menor luz de malla, en sentido descendente
- Se depositaron 100 gramos de arena en el tamiz superior (en el de mayor luz de malla)
- Se sometió a un proceso de tamizado durante 10 minutos.

Por otro lado, los equipos empleados para calcular la densidad de la muestra, fueron los siguientes:

- Una probeta o recipiente graduado de una capacidad de 100 ml
- Granatario de gran precisión

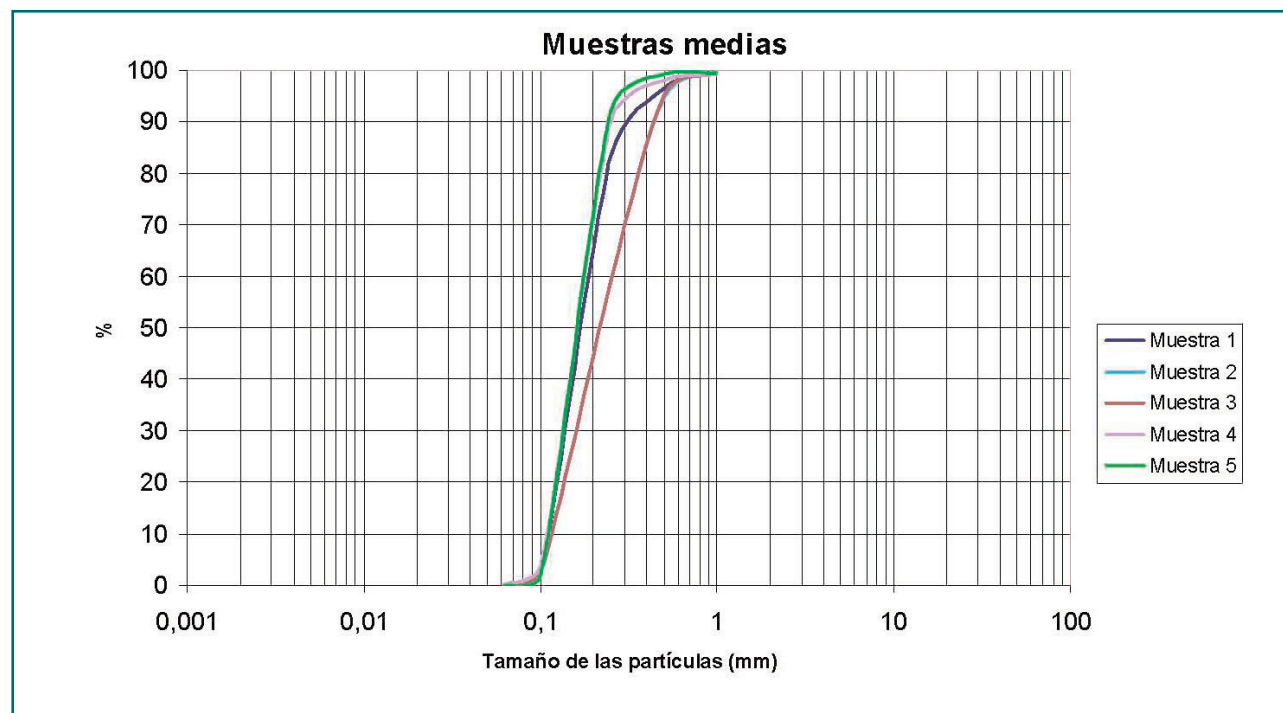
El procedimiento empleado es el comúnmente conocido consistente en pesar distintas cantidades de la muestra de arena, en este caso comprendidas entre 40 y 70 g., en una probeta de 100 ml., para posteriormente obtener su volumen. La relación entre una y otra medida se corresponderá con el valor de la densidad.

Se realizaron un total de 20 medidas con cada muestra obteniéndose los siguientes resultados.

El análisis que se ha realizado y que se refleja en este artículo, ha sido desarrollado en una draga cuya cántara tiene una longitud total de 30,25 m y un flujo volumétrico de $2,19 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 1. Tamizado de las muestras							
ϕ (mm)	PHI	Nº Tamiz	% que pasa				
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
1,00	0	18	99,81	99,81	99,59	99,33	99,24
0,500	1,00	35	96,55	94,82	95,50	97,61	98,34
0,250	2,00	60	83,52	59,27	59,23	92,92	92,07
0,100	3,32	140	3,17	0,66	0,51	3,96	2,23
0,0625	4	230	0,18	0,12	0,04	0,19	0,05

Fig. 1. Curva granulométrica.



3. Resultados

Con los resultados obtenidos en el tamizado (tabla 1) y en la curva granulométrica (figura 1) se han determinado tanto los diámetros equivalentes, correspondientes al d_{50} , como la densidad de cada una de las muestras (tabla 2).

3.1. Velocidad de sedimentación de los granos en el caso de estudio

Todos los parámetros que aparecen en la ecuación 1 son conocidos excepto φ que para una arena de estas características tiene un valor de 0,7 (Miedema, 1995), y el coeficiente de la partícula C_d que es

función del número de Reynolds (ecuaciones 3, 4 y 5). El número de Reynolds se ha calculado en función del tipo de flujo, lógicamente. El resto de parámetros como el diámetro medio y la densidad del grano ya han sido calculados anteriormente según se aprecia en la tabla 2.

Comparando los distintos valores de la velocidad de sedimentación del grano de arena obtenidos con el empleo de cada una de las ecuaciones (Tabla 3), se observa que:

1. Para este tipo de arena se pueden emplear indistintamente las ecuaciones de Stokes y Budryck puesto que los resultados son prácticamente iguales, no ocurriendo lo mismo cuando se emplea la ecuación de Rittinger, motivo por el cual los resultados de esta ecuación no se tendrán en cuenta.
2. Los valores que se obtienen cuando se emplea la ecuación general son siempre inferiores a los obtenidos con cualquiera de las otras tres ecuaciones.
3. Cuando no se consideran los granos como individuales sino como una nube de ellos a los que hay que aplicarles un coeficiente corrector, los valores de la velocidad obtenida son sensiblemente inferiores a los obtenidos sin esta consideración.

Tabla 2. Diámetros y densidades medias de las muestras

Muestra	d_{50} (mm)	φ_{arena} (Kg/m ³)
1	0,175	1188,27
2	0,210	1085,30
3	0,218	1106,81
4	0,165	1394,63
5	0,160	1307,15

3.2. Coeficiente corrector de la velocidad de sedimentación

Las ecuaciones relacionadas anteriormente dan los valores de las velocidades de sedimentación para cada grano individual. Pero los granos, en su movimiento descendente, desplazan hacia arriba el mismo volumen de agua. En la mezcla esto quiere decir que cuando algunos granos están sedimentando, se produce una velocidad del flujo de agua ascendente, lo cual da lugar a que la velocidad de sedimentación de los granos disminuya. Por el contrario, a muy bajas concentraciones, la velocidad de sedimentación aumentará. Richardson y Zaki (1954) proponen la siguiente ecuación para concentraciones C_v comprendidas entre 0 y 0.3

$$\frac{V_c}{V} = (1 - C_v)^\beta \tag{9}$$

Teniendo β , los siguientes valores:

$Re < 0.2$	$\beta = 4.65$
$Re > 0.2$ y $Re < 1.0$	$\beta = 4.35 \times Re - 0.03$
$Re > 1.0$ y $Re < 200$	$\beta = 4.45 \times Re - 0.1$
$Re > 200$	$\beta = 2.39$

Siendo la velocidad V_c , la nueva velocidad corregida.

El valor de la concentración C_v (6,3%) es un valor medio de los distintos tipos de arena y se ha obtenido durante el proceso de llenado de la cántara en el momento inicial, contando con que su volumen total es de 1582 m³, el tiempo de carga hasta la toma de la muestra 12 minutos y el volumen de arena cargado en ese tiempo era de 100 m³.

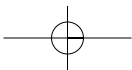
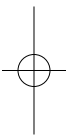
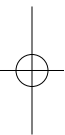
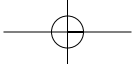
En la tabla 3 se muestran los resultados de los valores de las velocidades empleando las cuatro ecuaciones anteriormente mencionadas así como la ecuación (9) que tiene en cuenta el coeficiente corrector según Richardson y Zaki.

Aunque es conocido que en dependencia del tipo de flujo se debe emplear una de las 4 ecuaciones anteriormente mencionadas, en este artículo se ha calculado dicha velocidad empleando las cuatro ecuaciones al objeto de hacer un análisis comparativo de los resultados.

4. Rendimiento total del proceso de llenado

La calidad del proceso de sedimentación se puede definir como la relación entre la cantidad total de sólidos que se pierden y la cantidad total de sólidos bombeados. Entre los factores influyentes en el proceso de llenado de la cántara se encuentran, la distribución del grano, la densidad del sólido, el flujo volumé-

Tabla 3. Velocidades de sedimentación					
		Sus ecuaciones		Ecuación General	
Muestra 1	Stokes	$V = 2,120 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,922 \cdot 10^{-3}$	$V = 1,937 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,771 \cdot 10^{-3}$
	Budryck	$V = 2,12 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,922 \cdot 10^{-3}$	$V = 1,937 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,771 \cdot 10^{-3}$
	Rittinger	$V = 14,706$	$V_c = 12,588$	$V = 0,025$	$V_c = 7,529 \cdot 10^{-3}$
Muestra 2	Stokes	$V = 1,127 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,06 \cdot 10^{-3}$	$V = 1,030 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 9,736 \cdot 10^{-3}$
	Budryck	$V = 1,127 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,059 \cdot 10^{-3}$	$V = 1,030 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 9,736 \cdot 10^{-3}$
	Rittinger	$V = 9,79$	$V_c = 8,38$	$V = 0,016$	$V_c = 6,376 \cdot 10^{-3}$
Muestra 3	Stokes	$V = 1,648 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,499 \cdot 10^{-3}$	$V = 1,506 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,114 \cdot 10^{-3}$
	Budryck	$V = 1,648 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,499 \cdot 10^{-3}$	$V = 1,506 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 1,114 \cdot 10^{-3}$
	Rittinger	$V = 11,618$	$V_c = 9,945$	$V = 0,02$	$V_c = 6,049 \cdot 10^{-3}$
Muestra 4	Stokes	$V = 4,267 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 3,536 \cdot 10^{-3}$	$V = 3,899 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 3,285 \cdot 10^{-3}$
	Budryck	$V = 4,266 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 3,536 \cdot 10^{-3}$	$V = 3,899 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 3,285 \cdot 10^{-3}$
	Rittinger	$V = 21,485$	$V_c = 18,391$	$V = 0,037$	$V_c = 6,196 \cdot 10^{-3}$
Muestra 5	Stokes	$V = 3,063 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 2,689 \cdot 10^{-3}$	$V = 2,799 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 2,478 \cdot 10^{-3}$
	Budryck	$V = 3,062 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 2,688 \cdot 10^{-3}$	$V = 2,798 \cdot 10^{-3}$	$V_c = 2,485 \cdot 10^{-3}$
	Rittinger	$V = 18,485$	$V_c = 15,823$	$V = 0,032$	$V_c = 5,981 \cdot 10^{-3}$



Análisis de rendimiento de la cántara de una draga de succión en marcha en función de la granulometría del material transportado

trico de mezcla bombeado, la concentración, la intensidad de la turbulencia, la temperatura y la geometría de la cántara. Esta última, que es independiente del material bombeado, es fundamental a la hora de estimar el tiempo óptimo de carga. También, este tiempo óptimo de carga influye de manera directa en el rendimiento del proceso considerando a este como un ciclo completo pero teniendo en cuenta que el valor que hay que optimizar es la relación entre el volumen o peso transportado y el tiempo que dura el ciclo completo, carga, transporte y descarga. En este artículo, sólo se ha tratado el análisis del proceso de llenado de la cántara.

En este sentido, se ha considerado que la cántara de esta draga de succión en marcha está dividida en cuatro partes

- 1.- Zona de entrada de la mezcla en la que la distribución del grano es uniforme en una sección transversal de la cántara
- 2 y 3.- Zonas de sedimentación en las que los granos sedimentan
- 4.- Zona de salida del agua, a ser posible sin sedimentos, también denominada zona de overflow

Se considerará que los granos están distribuidos uniformemente y son desprendidos del flujo cuando se alcanza la zona de sedimentación. Cada grano está en la cántara durante un tiempo fijo y se mueve dentro de ésta siguiendo una línea recta. La pendiente de esta línea dependerá de la velocidad de sedimentación v y la velocidad del flujo de mezcla por encima del sedimento s_0 . Lógicamente, granos con un diámetro grande sedimentarán todos mientras que granos con diámetro pequeño, sólo sedimentarán en parte. Para un diámetro de grano d_0 , la velocidad de sedimentación vendrá expresada por la ecuación (10)

$$V_0 = S_0 \cdot \frac{H}{L} = \frac{Q}{W \cdot L}$$

siendo:

$$S_0 = \frac{Q}{W \cdot H}$$

S_0 : Velocidad del flujo en la base de la cántara (11)

Q : caudal de entrada

W : ancho de la cantara

L : longitud de la cántara

H : altura de la cántara

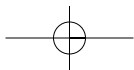
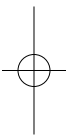
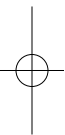
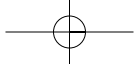
La velocidad v_0 se puede definir como un parámetro de carga propio de la cántara que influye en el tiempo que tiene para sedimentar el grano que circula con una velocidad de sedimentación v . Granos con una velocidad mayor que v_0 sedimentarán rápidamente de manera que el rendimiento de sedimentación de este tipo de partículas sería la unidad. Granos con una velocidad más pequeña sólo sedimentarán cuando alcancen la zona de sedimentación. Se puede definir, por tanto, el rendimiento de sedimentación r_g como la relación entre ambas velocidades, la velocidad de flujo v y la velocidad v_0 .

$$r_g = \left(\frac{v}{v_0} \right)$$

Para un grano (p_0 , por ejemplo) con una velocidad de sedimentación mayor que v_0 , el rendimiento de la sedimentación se obtendrá integrando la ecuación anterior

$$r_b = (1 - p_0) + \int_0^{p_0} r_g \cdot dp$$

Tabla 4. Datos de la cántara					
Zona	Capacidad (m³)	Altura: H (m)	Ancho: W (m)	V_0 (m/s)	S_0 (m/s)
1	95	7,04	3,92	0,0183748	0,078954199
2	280	7,04	5,67	0,0127459	0,054767526
3	891	7,04	8,537	0,00847736	0,036426176
4	340	7,04	9,689	0,00746358	0,032070056



Análisis de rendimiento de la cántara de una draga de succión en marcha en función de la granulometría del material transportado
Tabla 5. Relación de velocidades

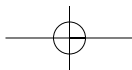
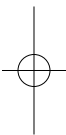
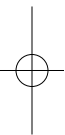
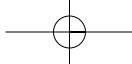
Muestra			Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
			v/v_0	v/s_0	v/v_0	v/s_0	v/v_0	v/s_0	v/v_0	v/s_0
1	Stokes	Ec. 1	0,105	0,025	0,152	0,035	0,229	0,053	0,260	0,060
		Ec. 6	0,115	0,027	0,166	0,039	0,250	0,058	0,284	0,066
		Ec. 9	0,105	0,024	0,151	0,035	0,227	0,053	0,258	0,060
	Budryck	Ec. 1	0,105	0,025	0,152	0,035	0,229	0,053	0,260	0,060
		Ec. 7	0,115	0,027	0,166	0,039	0,25	0,058	0,284	0,066
		Ec. 9	0,105	0,024	0,151	0,035	0,227	0,053	0,257	0,060
2	Stokes	Ec. 1	0,056	0,013	0,081	0,019	0,122	0,028	0,138	0,032
		Ec. 6	0,061	0,014	0,088	0,021	0,133	0,031	0,151	0,035
		Ec. 9	0,058	0,013	0,083	0,019	0,125	0,029	0,142	0,033
	Budryck	Ec. 1	0,056	0,013	0,081	0,019	0,122	0,028	0,138	0,032
		Ec. 7	0,061	0,014	0,088	0,021	0,133	0,031	0,151	0,035
		Ec. 9	0,058	0,013	0,083	0,019	0,125	0,029	0,142	0,033
3	Stokes	Ec. 1	0,082	0,019	0,118	0,028	0,178	0,042	0,202	0,047
		Ec. 6	0,090	0,021	0,129	0,030	0,194	0,045	0,221	0,051
		Ec. 9	0,082	0,019	0,118	0,027	0,177	0,041	0,201	0,047
	Budryck	Ec. 1	0,082	0,019	0,118	0,028	0,178	0,041	0,202	0,047
		Ec. 7	0,090	0,021	0,129	0,030	0,194	0,045	0,221	0,051
		Ec. 9	0,082	0,019	0,118	0,027	0,177	0,041	0,201	0,047
4	Stokes	Ec. 1	0,212	0,049	0,306	0,071	0,460	0,107	0,522	0,122
		Ec. 6	0,232	0,054	0,335	0,078	0,503	0,117	0,572	0,133
		Ec. 9	0,192	0,045	0,277	0,065	0,417	0,097	0,474	0,110
	Budryck	Ec. 1	0,212	0,049	0,306	0,071	0,460	0,107	0,522	0,122
		Ec. 7	0,232	0,054	0,335	0,078	0,503	0,117	0,572	0,133
		Ec. 9	0,192	0,045	0,277	0,065	0,417	0,097	0,474	0,110
5	Stokes	Ec. 1	0,152	0,035	0,220	0,051	0,330	0,077	0,375	0,087
		Ec. 6	0,167	0,039	0,240	0,056	0,361	0,084	0,410	0,096
		Ec. 9	0,146	0,034	0,211	0,050	0,317	0,074	0,360	0,084
	Budryck	Ec. 1	0,152	0,035	0,220	0,051	0,330	0,077	0,375	0,087
		Ec. 7	0,167	0,039	0,240	0,056	0,361	0,084	0,410	0,096
		Ec. 9	0,146	0,034	0,211	0,050	0,317	0,074	0,360	0,084

La representación de esta ecuación se correspondería con una curva de distribución del grano en la que en vez de usar el diámetro del grano en el eje horizontal, se usa la velocidad de sedimentación dividida por los parámetros de carga de la cántara.

Hasta ahora, se ha considerado uniforme la distribución de la velocidad de flujo, aunque está demostrado (Koning 1977) que aunque esta distribución no sea uniforme, el rendimiento de la sedimentación no cambia. Por otro lado, para una sedimentación ideal siempre se

asume que el flujo es laminar pero hay que tener en cuenta que el flujo turbulento reduce la velocidad de sedimentación del grano y por tanto el rendimiento total de la sedimentación. Cuando se produce flujo turbulento, dicha velocidad dependerá del número de Reynolds del flujo en la cántara, que viene definido por la siguiente ecuación (Miedema y Vlasblom).

$$Re = \frac{Q}{v \cdot (W + 2 \cdot H)} \quad (14)$$



Análisis de rendimiento de la cántara de una draga de succión en marcha en función de la granulometría del material transportado

Tabla 6. Rendimientos de la cántara según sea un grano individual, una nube de granos y empleando el factor de corrección

Ecuación de Stokes												
Ecuación general con Stokes												
Ecuación con factor de corrección para Stokes												
"rb"	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Muestra 1	0,113	0,162	0,240	0,271	0,103	0,148	0,220	0,248	0,103	0,147	0,218	0,246
Muestra 2	0,061	0,087	0,130	0,147	0,056	0,080	0,119	0,135	0,057	0,082	0,122	0,139
Muestra 3	0,088	0,126	0,188	0,213	0,081	0,116	0,172	0,195	0,080	0,115	0,172	0,194
Muestra 4	0,223	0,316	0,462	0,518	0,205	0,290	0,425	0,478	0,186	0,265	0,389	0,437
Muestra 5	0,162	0,231	0,340	0,383	0,148	0,211	0,312	0,352	0,143	0,203	0,301	0,339
Ecuación de Budryck												
Ecuación general con Budryck												
Ecuación con factor de corrección para Budryck												
"rb"	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Muestra 1	0,113	0,162	0,240	0,271	0,103	0,148	0,220	0,248	0,103	0,147	0,218	0,246
Muestra 2	0,061	0,087	0,130	0,147	0,056	0,080	0,119	0,135	0,057	0,082	0,122	0,138
Muestra 3	0,088	0,126	0,188	0,213	0,081	0,116	0,172	0,195	0,080	0,115	0,172	0,194
Muestra 4	0,223	0,316	0,462	0,518	0,205	0,290	0,425	0,478	0,186	0,265	0,389	0,437
Muestra 5	0,162	0,231	0,340	0,383	0,148	0,211	0,312	0,352	0,143	0,203	0,301	0,339

En la que ν representa la viscosidad del fluido que en nuestro caso siempre consideraremos agua de mar y cuyo valor medio es $1,05 \cdot 10^{-6} \text{ Kg/(m}\cdot\text{s)}$.

De la observación de la ecuación, se puede deducir que para un flujo y viscosidad constantes, el n° de Re dependerá de las dimensiones de la cántara. Unas dimensiones grandes tanto de altura como de longitud de la cántara, supondrían un n° de Re pequeño lo cual no parece atractivo desde un punto de vista económico.

Algunos autores (Camp, por ejemplo) usan la ecuación bidimensional de la difusión turbulenta para determinar la disminución en el rendimiento de la sedimentación como consecuencia de esta consideración de flujo turbulento.

Vlasblom y Miedema (1995), proponen una ecuación en función de los parámetros de la cántara y de las velocidades (Ecuaciones 15 y 16) que tiene en cuenta exclusivamente los efectos de la turbulencia sobre el rendimiento.

$$r_t = r_g^0 \left(1 - 0,184 \cdot r_g^{0,88-0,2r_g} \left(1 - \text{Tanh} \left(r_g^{-0,13-0,8r_g} \cdot \left(\text{Log} \left(\frac{\nu}{s_0} \right) + 0,5 + r_g^{-0,33-0,94r_g} \right) \right) \right) \right) \quad (15)$$

$$r_b = \int_0^1 r_g \cdot r_t \cdot dp \quad (16)$$

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones 10 y 11 para cada una de

las zonas de la cántara pueden apreciarse en la tabla 4.

En la tabla 5 están reflejados los valores de las relaciones existentes entre la velocidad de sedimentación del grano ν y las velocidades ν_0 y s_0 anteriormente expuestas, aplicadas a cada una de las muestras y para cada una de las ecuaciones, incluida la ecuación general, en la que se ha redondeado al tercer decimal.

4.1. Rendimiento global de la cántara

El rendimiento global de la cántara se obtiene empleando las ecuaciones 15 y 16. Los resultados de los distintos rendimientos obtenidos por aplicación tanto de las distintas ecuaciones considerando el grano individual como empleando el coeficiente corrector cuando se considera como una nube de granos aparecen en la tabla 6.

5. Conclusiones

- En todos los casos estudiados, los valores de las velocidades de sedimentación son totalmente coincidentes cuando se emplean los criterios de Stokes y Budryck, no ocurriendo lo mismo cuando se emplea la ecuación de Rittinger, lo cual parece lógico dado

Fátima Calderay Cayetano, Vanesa Durán Grados, Juan J. Muñoz-Pérez, Juan Moreno Gutiérrez

- el tipo de flujo (turbulento) que se produce con este diámetro de grano
2. La ecuación general podría ser empleada como caso más desfavorable a la hora de predecir el rendimiento de la cántara en todos los casos. Entre un 6 % y 10 % en los casos de Stokes y Budryck
3. Cuando se emplea el coeficiente corrector de velocidad de sedimentación no considerando al grano como una unidad individual sino agrupados como una nube de ellos, el rendimiento teórico que se obtiene es inferior a cuando se considera el grano individual en porcentajes comprendidos también entre el 6 % y el 10 %
4. Como consecuencia de lo anterior, los resultados que reflejan la ecuación general y la ecuación de Richardson y Zaki son prácticamente coincidentes
5. Los rendimientos obtenidos en cada una de las zonas de la cántara aumentan conforme aumenta la densidad del material y disminuye la altura de la cántara. ♦

Referencias:

-Camp, T.R. 1936, "Study of rational design of settling tanks". Sen. Works Journal, Sept. 1936, page 742.

-Camp, T.R. 1946, "Sedimentation and the design of settling tanks". ASCE Trans. 1946, page 895.

-Camp, T.R. 1953, "Studies of sedimentation design". Sen. Ind. Wastes, jan. 1953.

-De bree, S.E (1975). The application of underwater dredging pump. MTI. Puertos y Dragados

-Dobbins, W.E. 1944, "Effect Of Turbulence On Sedimentation". ASCE Trans. 19443, page 629.

-Groot, J.M. 1981. "Rapport Beumbezinking, Boskalis 1981. (From lecture notes of v/d Schriek 1995).

-Gutiérrez Mas, J.M, Moral, J.P, Sánchez A, Domínguez S, Muñoz Pérez, J.J. (2003) "Multicycle sediments on the continental shelf of Cadiz (SW Spain). Estuarine, Coastal and Shelf Science 57 (2003) 667-677.

-Koning, J. de 1977, "Constant Tonnage Loading System of Training Suction Hopper Dredges".

Proc. Modern Dredging, The Hague, The Netherlands 1977.

-Miedema, S.A. 1981, "The mixture flow and settlement of particles in Trailing Suction Hopper Dredges". Report Sc0/81/103 (in Dutch), Delft University of Technology, 1981.

-Miedema, S.A. and Rhee, C. Van (2007). "A sensitivity analysis on the effects of dimensions and geometry of trailing suction hopper dredger". WODCON Orlando, FL, USA

-Miedema, S.A. and Vlasblom, W. J. (1996). "Theory For Hopper Sedimentation". 29th Annual Texas A&M Dredging Seminar. New Orleans, June

-Moreno Gutiérrez, J. Muñoz Pérez, J.J. Durán Grados, Vanessa (2003). "Las Bombas de Dragado y sus Pérdidas de Carga". Revista de Obras Públicas. Páginas 59-65. Madrid 2003

-Muñoz Pérez, J.J, Gutiérrez Mas, J.M, Moreno Gutiérrez, J. Español L, Moreno, L. and Bernabeu, A. (2003) "Portable Meter System for Dry Weight Control in Dredging Hoppers"

-Muñoz Pérez, J.J, Moreno, L. (2005) "Comments on "Temporal assessment of sediment transport

from Beach nourishments by using foraminifera as natural tracers" Coast. Eng. 52 205-219

-Ooijens, S. (1999). "Adding Dynamics to the Camp Model for the Calculation of Overflow Losses". Terra et Aqua (76), pp. 12-21

-Reynolds, O. (1884). "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinous and of the Law of resistance in parallel channels". Phils. Trans. Roy. Soc.

-Rowe, P.N. (1961) Trans. "Inst. Chem. Engr".

-Richards, R.H (1907). "Trans. A.M. Inst. Mining. Met. Engineer"

-Richardson, J.F. and Zaki, W.N (1954). "Sedimentation and Fluidization: I", Trans. Inst. Chem. Eng.: 32-35.

-Vlasblom, W.J. and Miedema, S.A. 1995, "A theory for determining sedimentation and overflow losses in hoppers". Proc. WODCON XIV, Amsterdam 1995